

EVALUASI TEKNIS OPERASIONAL HYBRID BOILER DI INDUSTRI PENGOLAHAN KAYU PT.TRIOWIRA KALIMANTAN

Mamat

Pusat Penelitian Fisika – LIPI

Jln. Sangkuriang (komplek LIPI) No. 21/154D, Bandung

Telepon: (022)250 3052, 250- 7773 – Fax : (022) 250 3050

E – mail: sik_lik@ymail.com

ABSTRAK

Suatu *hybrid boiler* mengkonsumsi bahan bakar *sawdust* 700 kg/jam dapat menghasilkan uap 2500 kg/jam dan tekanan 18 bar. Selama operasi berlangsung terjadi elutriasi bahan bakar 10 %, sehingga jumlah aktual bahan bakar yang dapat dibakar 630 kg/jam dapat menghasilkan panas 3188 kW_h, maka uap yang dihasilkan 2460 kg/jam dan tekanan 18 bar. Dengan pengaturan damper gas buang secara tepat, sehingga tidak terjadi elutriasi bahan bakar, maka panas yang dihasilkan 3542.3 kW_h dan uap yang dihasilkan menjadi 3014 kg/jam. Proses pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar *hybrid boiler* berlangsung secara *bubbling* dan tebal pasir media dari ujung atas nozzle ke permukaan pasir 200 mm, dan ukuran butir pasir yang digunakan antara 0.5 sampai 1mm. *Pressure drop* yang terjadi dari aliran udara menembus pasir 4748 Pa (474.8 kg/m^2) < *FDFan pressure* adalah 600 kg/m², sehingga tidak terjadi *back pressure* dan proses *bubbling* dapat berlangsung baik. *Pressure drop* pada *water tube boiler*, *fire tube boiler*, *gas plenum*, *gas ducting* dan *cyclone* adalah 425.708 kg/m² > *IDFan pressure* (220 kg/m²). Dengan demikian jumlah *pressure drop* pada *hybrid boiler* adalah 900.51 kg/m² > *FDFan* dan *IDFan pressure* (820 kg/m²). Daya yang dibutuhkan untuk mengisap gas buang adalah 732.56 kgm/det, *IDFan efficiency* adalah 90 %, dan *electrical motor efficiency* 90 %, maka kebutuhan daya motor adalah 12 HP > daya motor listrik untuk *IDFan* (10 HP). Dengan demikian, *hybrid boiler* ini tidak dapat dioperasikan pada kondisi beban maksimum.

Kata kunci : hybrid boiler, uap, sawdust, tekanan uap, temperatur.

1.PENDAHULUAN

Suatu industri pengolahan kayu PT.Triowira Kalimantan di Bekasi setiap harinya menghasilkan limbah biomassa *sawdust* sebanyak 16800 kg. Limbah *sawdust* ini sangat ringan, sehingga mudah terbang dibawa angin dan menimbulkan polusi lingkungan. Dengan demikian, *sawdust* menimbulkan endapan di rumah yang terletak disekitar industri tersebut, sehingga rumah banyak mengalami kerusakan. Untuk mencegah terjadinya polusi limbah *sawdust*, maka di dalam ruang produksi *sawdust* dihisap menggunakan *pneumatic system* dan ditampung di dalam dua silo yang masing-masing mempunyai kapasitas 50 m³. Untuk menanggulangi polusi dari limbah tersebut, maka *sawdust* dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler. Pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar boiler menggunakan teknologi fluidisasi. Dengan dimanfaatkannya limbah *sawdust* sebagai sumber energi, sehingga *sawdust* bukan merupakan masalah, namun menjadi kebutuhan untuk menghasilkan energi guna berlangsungnya proses produksi. Transportasi *sawdust* dari silo ke cyclone menggunakan *air conveyor system* dan pemasukan *sawdust* ke hopper dikendalikan menggunakan *rotary lock* dan selanjutnya diumpankan ke ruang bakar boiler menggunakan *screw feeder*.

Teknologi pembakaran yang tepat untuk bahan bakar *sawdust* adalah *bubbling burning system* dan sebagai media pembakarannya adalah pasir kwarsa panas yang berfluidisasi. Dengan *bubbling system* ini bahan bakar *sawdust* diapungkan seiring dengan gerakan fluidisasi pasir, sehingga akan terjadi campuran homogen antara udara dan bahan bakar *sawdust* untuk melaksanakan pembakaran sempurna. Untuk membentuk *bubbling* pada pasir media di dalam ruang bakar dipasang nozzle udara sebanyak 169 buah dan masing-masing nozzle mempunyai lubang orifice sebanyak 10 lubang berdiameter 5 mm dan mempunyai sudut 45°. Udara dari masing-masing nozzle udara disuplai dari suatu *forced draft fan* yang mempunyai kapasitas adalah 3900 m³/jam \approx 4579 kg/jam dan maximum *static air pressure* adalah 6000 Pa. Supaya selama operasi berlangsung tekanan ruang bakar negatif, maka gas buang di dalam ruang bakar dihisap menggunakan suatu *induced draft fan* yang mempunyai kapasitas adalah 7000 m³/jam dan maximum *static air pressure* adalah 2200 Pa.

Konstruksi *hybrid boiler* terdiri dari *water tube boiler* dapat berfungsi sebagai *steam evaporator* dan *fire tube boiler* dapat berfungsi sebagai *steam evaporator* dan juga *preheater*. Dinding ruang bakar dibuat *water wall*, sehingga panas yang mengalir melalui dinding sebagai sumber panas untuk merubah fasa air menjadi fasa uap. *Hybrid boiler* ini mempunyai kapasitas 2500 kg uap/jam dan tekanan uap 18 bar.

2.METODE

2.1. Ruang Bakar

Media pembakar bahan bakar *sawdust* adalah pasir kwarsa panas, ukuran butir pasir antara 0.5 mm sampai 1 mm. Tebal pasir di dalam ruang bakar 300 mm dari dasar, tinggi nozzle udara 100 mm, maka tebal pasir dari ujung nozzle ke permukaan atas pasir 200 mm. Massa jenis *sawdust* 250 kg/m³ dan laju bahan bakar *sawdust* 2.8 m³/jam. Massa jenis pasir kwarsa 2200 kg/m³, gaya gravitasi 9.81 m/det², sehingga *pressure drop* di dalam *bed furnace* (Δp_b) adalah 4316.4 Pa dan distributor *poressure drop* (Δp_d) adalah 0.1 Δp_b ^[1] adalah 431.64 Pa, maka total *pressure drop* di dalam *bed furnace* (Δp_{tot}) adalah 4748 Pa < *air pressure* dari *forced draft fan* (6000 Pa). Laju alir udara yang ke luar dari lubang *orifice* 1.1628 kg/det untuk pengumpanan *sawdust* seberat 700 kg/jam. Lebar *bed furnace* (L_{bf}) adalah 1.2 m, maka *bed furnace area* (A_{bf}) adalah 1.44 m² < *design of bed furnace area* (2 m²). Udara yang mengalir melalui lubang *orifice* dipengaruhi *discharge factor*(c_d) adalah 0.6. Luas lubang *orifice* (A_{or}) adalah 12.56 mm² adalah *ratio* antara luas lubang *orifice* dan luas *bed furnace*^[1] adalah 0.0303, sehingga laju udara primer mengalir melalui lubang *orifice* dapat diperoleh 720 kg/jam dan laju udara sekundernya 3466 kg/jam dan total laju udara 4186 kg/jam, maka daya aliran udara 4.7 HP x 2 adalah 9.4 HP < daya *forced draft fan* (20 HP) dan kapasitas operasional (1.1628 kg/det) < *forced draft fan capacity* (1.26 kg/det).

2.2. Analisis Gas Buang

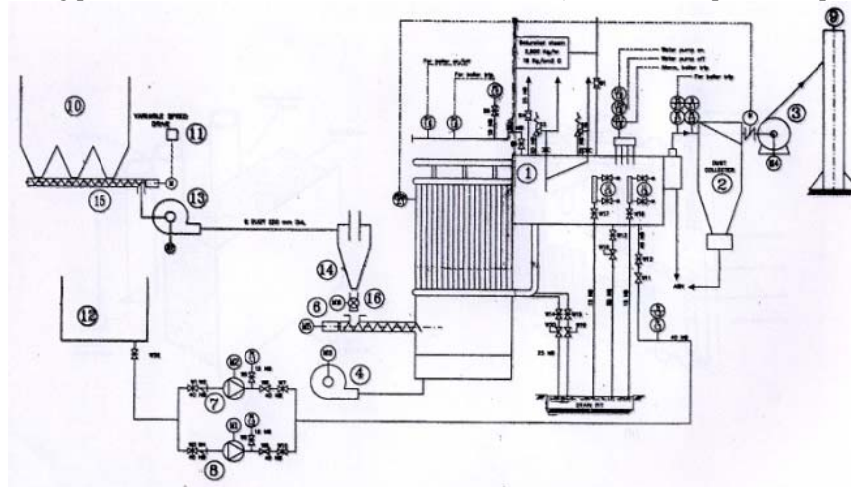
Gas buang dari hasil pembakaran bahan bakar *sawdust* terdiri dari CO₂, H₂O dan SO₂ merupakan hasil reaksi dari pembakaran unsur bahan bakar dengan O₂ dari udara, namun N₂ yang terkandung di dalam udara tidak turut bereaksi. Jadi pembakaran 1 kg C dapat menghasilkan 3.67 kg gas CO₂. Pembakaran setiap 1 kg H dapat menghasilkan 9 kg H₂O dan setiap 1 kg S dapat menghasilkan 2 kg gas SO₂, maka ratio udara dan bahan bakar teoritis dapat diperoleh 5.6 kg gas/kg bb. Untuk melaksanakan pembakaran sempurna perlu kelebihan udara 1.25 dari kebutuhan udara teoritis^[2] dan *factor* kelembaban udara^[3] 1.035, maka ratio udara dan bahan bakar aktual diperoleh 6.96 kg/kg bb. Jadi gas buang aktual dari hasil pembakaran bahan bakar *sawdust* 630 kg/jam diperoleh 4384.8 kg/jam \approx 1.218 kg/det < kapasitas *induced draft fan* (7500 m³/jam \approx 8830.5 kg/jam \approx 2.453 kg/det).

2.3. Analisis Termal

Panas spesifik dari limbah biomassa *sawdust* 4352 cal/gr \approx 18217.5 kJ/kg. Pada saat pengumpanan bahan bakar terjadi elutriasi 10 % dari jumlah bahan bakar yang diumpankan ke ruang bakar (70 kg/jam), maka jumlah bahan bakar yang dapat dibakar di dalam ruang bakar 630 kg/jam, maka energi panas dari hasil pembakaran bahan bakar *sawdust* 3188 kW_h. Kecepatan udara di dalam plenum 0.8 m/det, viskositas dinamis adalah 1.985 x 10⁻⁵, konduktivitas udara 0.02624 W/m °C, densitas udara 1.1774 kg/m³, sehingga bilangan *Reynold* (Re_a) aliran udara di dalam plenum 46745 dan bilangan *Prandle* (Pr_a) adalah 0.708, maka koefisien perpindahan konveksi untuk udara (h_{ca}) adalah 7.8 W/m² °C. Bilangan *Reynold* (Re_w) untuk aliran air jenuh adalah 4167 dan bilangan *Prandle* (Pr_w) adalah 0.97, konduktivitas air jenuh adalah 0.665 W/m °C, maka koefisien perpindahan konveksinya (h_{cw}) adalah 16 W/m² °C. Jadi konduktansi keseluruhannya (UA) adalah 10.5 W/°C dan panas jenis air jenuh adalah 4.4907 kJ/kg °C, maka *number of heat transfer unit* (NTU)^[4] adalah 2.7 x 10⁻⁴. Perbandingan panas air jenuh dan udara adalah 2.67 dan efektivitasnya 2 %, maka temperatur udara di dalam plenum adalah 41 °C. Jadi energi panas yang diserap udara di dalam plenum 48 kW.

Diestimasi elutriasi pasir 1 % jumlah pasir di dalam *fixed bed* adalah 13.8 kg/jam, panas jenis pasir 0.71 kJ/kg °C dan temperatur pasir adalah 520 °C, maka panas yang dibawa pasir ke luar cerobong 1.4 kW_h. Jumlah abu yang terbentuk dari hasil pembakaran *sawdust* 1.827 kg/jam, maka energi panas yang terkandung di dalam abu 27185 kJ/jam \approx 7.5 kW_h. Kapasitas panas air pada 30 °C adalah 4.179 kJ/kg °C, dan entalpi penguapan 2261 kJ/kg, maka kebutuhan panas untuk evaporasi air di dalam *sawdust* 49 kW_h. Kapasitas uap (cp_s) adalah 0.64 kJ/kg °C, maka kebutuhan panas untuk merubah uap air menjadi gas 11.97 kW. Panas spesifik *sawdust* 2.386 kJ/kg °C, temperatur bakar *sawdust*^[5] adalah 560 °C, maka panas yang dibutuhkan untuk pembakaran *sawdust* 246 kW_h. Temperatur gas buang yang ke luar dari plenum ruang bakar 200 °C, panas jenis gas buang (cp_{fg}) adalah 1.303 kJ/kg °C, maka jumlah panas yang dibawa gas buang 456.2 kW_h. Jadi jumlah panas yang dibutuhkan untuk melaksanakan proses pembakaran 820 kW_h dan jumlah panas yang

terkandung di dalam gas buang 2368 kW_h. Dengan demikian, temperatur gas buang yang mengalir pada permukaan bidang pemanas *water tube boiler* 1382 °C. Kontruksi *hybrid boiler* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hybride boiler

Keterangan gambar: 1 Hybrid boiler, 2 siklon, 3 induced draft fan, 4 forced draft fan, 5 kontrol, 6 screw feeder, 7 dan 8 feed pump, 9 chimney, 10 silo, 11 motor, 12 water tank, 13 air blower, 14 siklon, 16 air lock.

2.4. Analisis Kapasitas

Jumlah gas buang yang terbentuk 4872 kg/jam \cong 1.354 kg/det. Komposisi gas buang diperoleh 13.87 % CO₂, 10.95 % H₂O, 0.0145 % SO₂, 70.72 % N₂ dan 4.45 % O₂. Tekanan input dari *Forced Draft Fan* adalah 600 kg/m², tekan isap dari *Induced Draft Fan* adalah 220 kg/m², luas *bed* adalah 2 m², luas lubang gas output adalah 2 m² dan tinggi *bed* adalah 4 m, maka kecepatan aliran gas di dalam *bed* aliran gas pada lubang output 5.5 m/det. Perpindahan panas yang terjadi dari gas pembakaran ke *water wall* berlansung secara konveksi, radiasi dan konduksi. Densitas gas buang (ρ_g) adalah 0.30175 kg/m³, viskositas dinamis gas buang (μ_g) adalah 4.332×10^{-6} N.s/m², konduktivitas panas gas buang (k_g) adalah 0.08636 W/m °C. Bilangan *Prandtle* gas buang (Pr_g) adalah 0.705, diameter hidrolisnya 1.596 m, panjang 4 meter, bilangan *Reynold* (Re_D) adalah 0.766×10^6 . $Pr_D > 0.7$ dan $Re_D > 6000$, sehingga bilangan *Nuselt*^[4] adalah 1940, maka koefisien perpindahan konveksinya dapat diperoleh 105 W/m² °C. Luas bidang pemanas 25.45 m², *ratio* panjang dan jari-jari ruang luas bidang pemanas 25.45 m² dan volume ruang bakar 8 m³. *Ratio* panjang dan jari – jari ruang bakar 2.8, *ratio* ruang bakar atas dan tinggi 1, maka harga faktor bentuk (F_{1-2})^[5] adalah 0.4. Konstanta *Stefan-Boltzmann* (σ) adalah 5.669×10^{-8} Watt/m² K⁴, selisih temperatur pada *water wall* dan pusat panas 50 °C, maka koefisien perpindahan radiasinya (h_r) adalah 16315 W/m² °C. Konduktivitas pipa baja 19 W/m °C, diameter pipa yang digunakan adalah ϕ 1 1/2" atau ϕ 48 *schedule* 40 dan diameter dalam 40.6 mm. Jumlah pipa *water wall* 118 batang, maka kecepatan laju air di dalam pipa 0.00454 m/det. Densitas air jenuh 850 kg/m³, viskositas dinamis air jenuh 1.32×10^{-4} kg/m.det, maka bilangan *Reynold* (Re) adalah $1189 < 2100$, laju alir air di dalam pipa adalah laminar. Dengan kondisi $Re < 2100$ dan $Pr < 0.7$, sehingga bilangan *Nuselt* (Nu) adalah 2.8, maka kefisien konveksi (h_c) adalah 46.2 W/m °C. Jadi koefisien perpindahan panas keseluruhan dapat diperoleh dari rumus sebagai berikut:

$$- \frac{\quad}{\quad} \quad (1)$$

diperoleh 32 W/m² °C. Jadi panas yang diterima air adalah 1092.110 kW_h dan entalpi uap (h_g) adalah 2798.5 kJ/kg, maka jumlah massa air yang dievaporasikan (m_{ev}) dari *water tube boiler* adalah 1405 kg/jam. Temperatur gas buang masuk ke dalam *fire tube boiler* adalah 723 °C dan panas yang dikandung gas buang adalah 1276 kW_h dan panas yang diserap air jenuh di dalam *fire tube boiler* adalah 819.8 kW_h, maka massa air yang dapat dievaporasikan (Q_{ev2}) adalah 1055 kg/jam. Dengan demikian, jumlah uap yang dapat diproduksi 2460 kg/jam. dan tekanannya adalah 18 bar.

2.5. Pressure Drop

Temperatur gas di dalam *free bed* adalah 1384 °C, kecepatan gas buang di dalam *free bed* adalah 5.5 m/det, bilangan *Reynold* (*Re*) adalah $4.8 \times 10^5 > 6000$ aliran turbulen, *factor* koreksi kekasaran (*e*)^[6] adalah 0.045, *relative roughness*(*e/D*) adalah 0.000036 dan *friction coefficient* adalah 0.013, maka *pressure drop* pada *free bed* 0.0193 kg/m². *Fire tube* untuk *input* menggunakan pipa *schedule 40* dan diameter 2 inci (60.325 mm), diameter dalam 52.5 mm, panjang 3600 mm dan jumlahnya adalah 60 buah. Temperatur gas buang pada *fire tube* adalah 723 °C, luas total *tube* 0.13 m², luas plenum dari *water tube boiler* ke *fire tube boiler* 1.9782 m², *ratio* antara luas *tube* dan luas plenum 0.066, *contraction coefficient*^[7] adalah 0.62101, *loss coefficient* 0.376, kerapatan massa 0.3615 kg/m³, kecepatan aliran gas di dalam *fire tube* 70.63 m/det, maka *pressure drop* di dalam plenum 34.35 kg/m². Viskositas dinamis gas buang di dalam pipa *fire tube* 3.92213×10^{-10} N.s/m², *Reynold* (*Re*) di dalam *fire tube* 3.4×10^5 , *relative roughness* (*e/D*) adalah 0.000025, *friction factor* 0.0135, maka *pressure drop* 86 kg/m². Temperatur gas buang melewati *fire tube first stage* 350 °C, kerapatan massanya adalah 0.584 kg/m³, luas plenum 0.3 m², *ratio* luas plenum dan *fire tube* pada *first stage* adalah 0.1625 dan *contraction coefficient* dapat diperoleh 0.37, kecepatan gas di dalam plenum adalah 7 m/det, maka *pressure drop* 54.8 kg/m². Luas penampang *fire tube* 0.085 m², *fire tube second stage* 66 m/det, *contraction coefficient* 0.62, *loss coefficient* adalah 0.376, maka *pressure drop* 48.5 kg/m². Pada *ratio area* lubang plenum dengan *fire tube* 0.141, *contraction coefficient* 0.621, kecepatan aliran gas buang 6.93 m/det, *loss coefficient* diperoleh 0.371, maka *pressure drop* dapat diperoleh 64.2 kg/m². Luas *ducting* 0.075 m², luas plenum 0.3 m², *ratio* antara *ducting* dan plenum 0.25, *contraction coefficient* 0.626, *loss coefficient* 0.357, kecepatan aliran gas di dalam *ducting* 27.72 m/det, maka *pressure drop* 10.33 kg/m². *Relative roughness* pada *ducting* 0.016, panjang *ducting* total 6 m, viskositas dinamis 2.8719×10^{-6} N.s/m², bilangan *Reynold* aliran gas buang di dalam *ducting* 1.85×10^6 , *relative roughness* (*e/D*) adalah 0.000025, *friction coefficient* adalah 0.015, maka *pressure drop* adalah 11.43 kg/m² dan *pressure* pada *ducting* adalah 22.86 kg/m². *particle shape factor* (ϕ_s) adalah 0.7, *surface mean particle diameter* (*D_p*) adalah 600 µm, *density of particle* (ρ_s) adalah 14.375 gr/m³, *void fraction of bed of particles* (ϵ_s) adalah 0.6 dan *load filter* (*w*) adalah 0.01 gr/m², maka *pressure drop* pada siklon^[9] adalah 104.65 kg/m². Jadi *pressure drop* pada *water tube boiler*, *fire tube boiler*, gas plenum, gas *ducting* dan cyclone 425.708 kg/m² > *IDFan pressure* (220 kg/m²). Dengan demikian total *pressure drop* pada *hybride boiler* 900.51 kg/m² > *FDFan* dan *IDFan pressure* (820 kg/m²).

3.UJI COBA OPERASI

Pada saat uji coba operasi *hybride boiler* dilakukan bahan bakar *sawdust* berasal dari kayu agatis, kandungan air *sawdust* antara 9 sampai 20 (%) dan nilai panas adalah 16500 kJ/kg. Parameter yang diukur adalah temperatur pasir, temperatur cerobong, tekanan udara plenum, tekanan *freeboard*, tekanan uap dan laju uap. Pengukuran parameter ini dilakukan pada *hybrid boiler* kondisi beroperasi *satedy state* dan hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil pengujian *hybride boiler*

No	Uraian Pengujian	Hasil Pengukuran	Keterangan
01	Temperatur pasir	520 (°C)	
02	Temperatur cerobong	170 (°C)	
03	Tekanan udara plenum	2.5 kPa	
04	Tekanan <i>freeboard</i>	- 4 kPa	
05	Putaran <i>screw feeder</i>	6.5 rpm	320 kg/jam
06	Tekanan uap	17.5 bar	
07	Laju uap	1200 kg/jam	

Selama operasi berlangsung temperatur pasir yang dicapai adalah 520 °C dan temperaturnya sulit untuk dinaikkan lagi. Pengumpulan bahan bakar menggunakan *screw feeder* terkonsentrasi pada suatu daerah dan tidak merata, sehingga temperatur pasir tidak merata pula. Bila laju massa bahan bakar *sawdust* yang diumpangkan ke ruang bakar dibesarkan, temperatur pasir *drop* dan proses pembakaran berhenti. Untuk menjaga kestabilan pembakaran di dalam ruang bakar, bahan bakar *sawdust* yang diumpangkan adalah 320 kg/jam dapat menghasilkan uap adalah 1200 kg/jam dan tekanan uapnya adalah 17.5 bar. Kondisi ini hanya berlangsung selama 20 menit dan setelah 20 menit tekanan uap turun menjadi 14 bar dan setelah satu jam tekanan uap turun menjadi 12 bar, sehingga kapasitas uap yang dapat dicapai di bawah 1000 kg/jam < *turn down ratio* adalah 1000 kg/jam dan tekanan 18 bar, maka operasi *hybrid boiler* diberhentikan.

3. ANALISIS DAN DISKUSI

Tebal pasir media ujung atas air nozzle adalah 200 mm, dan butir pasir yang digunakan 0.5 sampai 1(mm) dan *pressure drop* yang terjadi adalah 4748 Pa (474.8 kg/m²) < *FDFan pressure* adalah 600 kg/m², sehingga tidak terjadi *back pressure* dan proses *bubling* dapat berlangsung dengan baik.

Jumlah *pressure drop* pada *water tube boiler*, *fire tube boiler*, *gas plenum*, *gas ducting* dan *cyclone* adalah $425.708 \text{ kg/m}^2 > IDFan \text{ pressure}$ (220 kg/m^2). Dengan demikian total *pressure drop* pada *hybrid boiler* adalah $900.51 \text{ kg/m}^2 > FDFan$ dan *IDFan pressure* (820 kg/m^2), sehingga tekanan gas hasil pembakaran di dalam ruang bakar positif, maka di dalam ruang bakar akan terjadi *back pressure*. Daya yang dibutuhkan untuk mengisap gas buang adalah 732.56 kgm/det , *IDFan efficiency* adalah 90 %, dan *electrical motor efficiency* 90 %, maka kebutuhan daya motor adalah 12 HP $> Electrical \text{ motor power for IDFan}$ (10 HP). Untuk mencegah tekanan di dalam ruang bakar positif dan beban *IDFan* tidak mengalami *over load*, maka pengumpanan bahan bakar *sawdust* ke ruang bakar tidak boleh maksimum, sebaiknya pengumpanan hanya dilakukan maksimum 75 %.

Bila *hybride boiler* dioperasikan pada beban penuh (*maximum load capacity*) akan terjadi *back pressure* dan motor listrik pada *IDFan* akan mengalami *over load*, sehingga beban arus listrik pada lilitan *coil* melebihi daya tahan lapisan email yang berfungsi sebagai *isolator* pada kawat *coil*, maka lapisan email kawat akan mengalami kerusakan. Dengan demikian, kawat *coil* akan mengalami arus singkat dan dapat menimbulkan kerusakan pada motor listrik.

Panas yang diterima air jenuh adalah 1092.110 kW_h dan entalpi uap (h_g) adalah 2798.5 kJ/kg , maka jumlah uap yang dihasilkan (m_s) dari *water tube boiler* adalah 1405 kg/jam . Temperatur gas buang masuk ke dalam *fire tube boiler* adalah 723°C dan panas yang dikandung gas buang adalah 1276 kW_h dan panas yang diserap air jenuh di dalam *fire tube boiler* adalah 819.8 kW_h , maka jumlah uap yang dapat dihasilkan (Q_s) adalah 1055 kg/jam . Dengan demikian, jumlah uap yang dapat dihasilkan dari operasional *hybrid boiler* adalah 2460 kg/jam dan tekanannya adalah $18 \text{ bar} < \text{target kapasitas}$ adalah 2500 kg/jam dan tekanan 18 bar .

Bila dilakukan *setting* pada *flue gas damper* yang tepat, sehingga tidak terjadi elutriasi di dalam ruang bakar, maka panas dari pembakaran *sawdust* adalah 3542.3 kW_h . Panas gas buang yang mengalir pada permukaan pemanas adalah 2722.3 kW dan temperatur gas buang yang mengalir pada permukaan pemanas adalah 1584°C , panas jenis gas buang adalah $1.2830 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, sehingga panas yang diserap air jenuh adalah 1256.62 kW_h dan uap yang dapat dihasilkan dari *water tube boiler* adalah 1617 kg/jam . Temperatur gas buang setelah ke luar dari bidang pemanas *water tube boiler* adalah 929°C dan panas yang dapat diserap air adalah 1085.68 kW_h , sehingga uap yang dihasilkan dari *fire tube boiler* adalah 1397 kg/jam , maka jumlah uap yang dihasilkan dari *hybrid boiler* adalah $3014 \text{ kg/jam} > \text{target kapasitas}$ adalah 2500 kg/jam dan tekanan uap 18 bar .

Pengujian awal dari *hybrid boiler* ini kapasitas uap yang dapat dicapai adalah 1200 kg/jam dan tekanan uapnya adalah 17.5 bar , selang waktu 20 menit tekanan uap ini turun menjadi 14 bar dan selang waktu satu jam tekanan uap turun lagi hingga 12 bar . Kondisi ini disebabkan bahan bakar *sawdust* yang diumpankan ke ruang *boiler* berasal dari kayu agatis, jenis kayu sifatnya ringan dan bentuk *sawdust* halus, sehingga sebagian bahan bakar *sawdust* tidak terbakar mengalami elutriasi terbawa gas buang ke luar, maka energi panas yang dihasilkan pembakaran *sawdust* ini tidak cukup untuk memproduksi uap sampai 2500 kg/jam pada tekanan uap 18 bar .

Pengumpanan bahan bakar *sawdust* menggunakan *screw feeder* terjadi penyebaran bahan bakar tidak merata pada luas permukaan pasir panas yang berfungsi sebagai media pembakar bahan bakar *sawdust*. Pengumpanan bahan bakar *sawdust* terkonsentrasi pada satu titik, sehingga temperatur pasir tidak merata dan bila pengumpanan bahan bakar diperbesar, maka temperatur pasir akan turun, temperatur pasir relatif lebih rendah dari temperatur bakar bahan bakar *sawdust* dan pembakaran akan berhenti.

Solusi untuk pengumpanan bahan bakar *sawdust* menggunakan *screw feeder* guna mencegah terkonsentrasi pada satu titik perlu dipasang nozel udara sekitar lubang *output* dari *screw feeder*. Bahan bakar *sawdust* yang ke luar dari *screw feeder* ditiup udara dari nozel tersebut, sehingga bahan bakar *sawdust* dapat tersebar keseluruh luas permukaan pasir panas serta merata. Dengan demikian, temperatur pasir akan stabil dan merata serta mampu melaksanakan proses pembakaran bahan bakar *sawdust* yang diumpankan ke ruang bakar.

4. KESIMPULAN

Pressure drop pada *water tube boiler*, *fire tube boiler*, *gas plenum*, *gas ducting* dan *cyclone* adalah $425.708 \text{ kg/m}^2 > IDFan \text{ pressure}$ (220 kg/m^2). Dengan demikian total *pressure drop* pada *hybride boiler*

adalah $900.51 \text{ kg/m}^2 > FDFan$ dan $IDFan \text{ pressure}$ (820 kg/m^2). Daya yang dibutuhkan untuk mengisap gas buang adalah 732.56 kgm/det , $IDFan \text{ efficiency}$ adalah 90 %, dan efisiensi motor listrik 90 %, maka kebutuhan daya motor adalah 12 HP > *Electrical motor power* untuk $IDFan$ (10 HP). Dengan demikian, *hybrid boiler* ini tidak boleh dioperasikan pada beban maksimum.

Pengumpanan bahan bakar *sawdust* menggunakan *screw feeder* cenderung tidak merata pada seluruh luas permukaan pasir panas sebagai media pembakar bahan bakar *sawdust*, namun terkonsentrasi pada suatu titik, sehingga temperatur pasir di dalam ruang bakar tidak merata dan sebagian temperatur permukaan pasir lebih rendah dari temperatur bakar bahan bakar *sawdust*. Dengan demikian, perlu alat bantu untuk meratakan pengumpanan bahan bakar *sawdust*, sehingga temperatur pasir stabil dan merata serta mampu melakukan pembakaran seluruh bahan bakar *sawdust* yang diumpankan ke ruang bakar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, *Biomass Fired FBC-CHP Plant Design*, Energy from Biomass Residues Supplemented by Fossil Fuels, Jakarta, 1997, hal annexIII-2
2. Bruner Calvin R, (1991), *Handbook of Incineration System*, McGraw – Hill, Inc
3. Lidinegg N, *Damferzeugung Danpfkessel Feurungngen*, Wein, Springer-Verlag, 1996, hal 128.
4. Holman.J.P.1981, “*Heat Transfer*” 5th Ed McGraw – Hill Kogakusha, Ltd.
5. Kreith Frank, Arko Prijono M.Sc, 1991 “*Prinsip – Prinsip Perpindahan Panas*” Edisi Ketiga, PT.Gelora Aksara Pratama.
6. Nagaratnam.S, 1984, “*Fluid Mechanics*”, Fourth Edition, Ramesh Chamber Khanna, Kahana Publishers 2-B, Nath Market, Nai Sarak Delhi – 110006.
7. Fox.Robert W, McDonald. Alant T, 1994, “*Introduction To Fluid Mechanics*”, Fourth Edition, John Willey & Sons, Inc. Canada.
8. Buthod Paul, Megyesy. Eugene F, 1983, “*Pressure Vessel Handbook*”, Pressure Vessel Handbook Publishing Inc, P.O.Box 35365, Tulsa, OK 74153.
9. Perry.Robert H, Green Don, 1984, *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook*, Sixth Edition, McGraw-Hill, Inc.